

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2024.0666

十字花科蔬菜中硫代葡萄糖苷含量、稳定性及提取工艺研究进展

郭尊奕¹, 刘嘉超², 胡梓煜¹, 丁晨阳¹, 游慎希², 刘心怡¹, 陈长明²

(1. 华南农业大学广州都柏林生命科学与技术学院 广州 510642; 2. 华南农业大学园艺学院 广州 510642)

摘要: 硫代葡萄糖苷简称硫苷, 是一类含硫的次生代谢产物, 广泛存在于十字花科蔬菜中。硫苷的种类繁多, 在植物中具有防御功能, 同时部分硫苷种类对人类健康有益, 而硫苷的含量和稳定性受植物本身和外界环境等多种因素的影响, 提取硫苷的方法也多样化, 受到研究者的广泛关注。综述了硫苷的种类和生物合成、硫苷的功效、硫苷在十字花科蔬菜的含量和分布、采前提高硫苷含量的方法、采后硫苷的稳定性、硫苷的提取工艺等, 并对未来的研究方向进行了展望。

关键词: 十字花科蔬菜; 硫代葡萄糖苷; 稳定性; 提取方法

中图分类号: S634+S635+S637

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)04-001-09

Research progress on the content, stability, and extraction technology of glucosinolates in Cruciferous vegetables

GUO Zunyi¹, LIU Jiachao², HU Ziyu¹, DING Chenyang¹, YOU Shenxi², LIU Xinyi¹, CHEN Changming²

(1. Guangzhou Dublin International College of Life Sciences and Technology, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China; 2. College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

Abstract: Glucosinolates (GLS) are a group of sulfur-containing secondary metabolites that are widely present in Cruciferous vegetables. There are different kinds glucosinolates, which serve defensive functions in plants and some of which are beneficial to human health. The content and stability of glucosinolates are influenced by various factors, including the plant itself and external environmental conditions. The methods for extracting glucosinolates are diverse and have attracted widespread attention from researchers. This review summarizes the types and biosynthesis of glucosinolates, their health benefits, the content and distribution in Cruciferous vegetables, pre-harvest methods to increase glucosinolate content, post-harvest stability, and extraction technologies. It also provides a prospective outlook on future research directions.

Key words: Cruciferous vegetables; Glucosinolates; Stability; Extraction method

十字花科蔬菜是在全球范围内广泛栽培和可食用的重要蔬菜, 主要包括白菜、甘蓝、西蓝花、萝卜等, 因其香气浓郁、口味独特, 并且含有丰富的酚类化合物、类黄酮和硫代葡萄糖苷等天然物质而深受人们喜爱^[1-2]。

硫代葡萄糖苷 (glucosinolates, GLS), 简称硫苷, 是一类含硫的次生代谢产物, 广泛存在于十字花科蔬菜中, 目前已发现 120 余种。硫苷不仅是十字花科蔬菜气味形成的重要前体物质^[3], 还在保护植株免受微生物病原体和昆虫侵袭方面起重要作用^[4-5]。此外, 大量研究表明, 硫苷还对人类健康具有良好功效, 能够预防慢性疾病, 具有抗氧化、抗癌

防癌以及调节机体免疫等功能^[6-7]。

近年来, 随着硫苷生物活性研究的深入, 其在人体保健、植物保护等方面的潜力逐渐被认识和重视。但是, 硫苷的含量和稳定性受到遗传、环境条件、植物发育阶段以及收获后处理等多种因素的影响。此外, 硫苷的提取和应用技术也在不断发展和优化中。笔者综述硫苷在十字花科蔬菜中的含量、稳定性和提取方法, 以期对深入理解硫苷的功效和应用潜力提供参考。

1 硫代葡萄糖苷的种类和生物合成

1.1 硫代葡萄糖苷的种类

收稿日期: 2024-10-28; 修回日期: 2025-01-03

基金项目: 广州科技计划项目 (2024B03J1304); 大学生创新创业训练计划项目 (202410564010)

作者简介: 郭尊奕, 男, 在读本科生, 研究方向为蔬菜遗传育种。E-mail: m19047119055@163.com

通信作者: 陈长明, 男, 教授, 研究方向为芥蓝、辣椒育种及生物技术。E-mail: cmchen@scau.edu.cn

硫苷由 β -D-硫代葡萄糖基、磺酰基和可变速链 R 基团组成,根据侧链 R 基团的不同,硫苷可分为脂肪族硫苷(aliphatic,侧链来源于甲硫氨酸、丙氨酸、缬氨酸、亮氨酸和异亮氨酸)、吲哚族硫苷(indolyl,侧链来源于色氨酸)和芳香族硫苷(aromatic,侧链来源于酪氨酸和苯丙氨酸)^[8-9]。其中,在十字花科植物中,硫苷大多数为脂肪族硫苷,小部分为吲哚族硫苷,而芳香族硫苷含量极低^[10]。

1.2 硫代葡萄糖苷的生物合成

脂肪族硫苷的生物合成大致可以分为三个阶段,而吲哚族硫苷仅包括第二与第三阶段。①氨基酸侧链的延长:参与侧链延长的氨基酸主要是苯丙氨酸、亮氨酸和甲硫氨酸^[11],延长的过程最多有 9 个循环,共包括 5 个反应,分别是初始转氨作用、终止转氨作用、乙酰辅酶 A 缩合、异构化作用和氧化脱羧反应,通过此类循环反应可产生更长的侧链^[12];②硫苷核心结构的合成:以侧链延长后的氨基酸为底物,通过氧化、共轭结合、C-S 键切割、葡糖基化和磺酸化等 5 个步骤形成^[13];③侧链的二级修饰:具有多种修饰路径,如脂肪族硫苷的氧化、羧基化、烯基化和苯甲酰化,吲哚族硫苷的羧基化和甲基氧化等^[14],不同的修饰路径能够得到不同活性的硫苷,这也促成了硫苷种类和功能的多样性^[15]。

2 硫代葡萄糖苷的功效

硫苷储存于液泡中,当十字花科蔬菜的组织在加工、咀嚼或降解时,硫苷合成基因及转录因子会被各类信号物质激活,将硫苷与植物细胞内的黑芥子酶结合,并水解成异硫氰酸盐、硫氰酸酯和腈类等活性物质,在人类健康、植物保护和风味贡献等方面具有重要作用^[16-18]。

2.1 人类健康

多种硫苷及其水解产物都对人类健康有积极作用。其中,最具有代表性的是脂肪族硫苷中的萝卜硫苷,其在黑芥子酶的作用下分解成萝卜硫素,萝卜硫素是目前为止发现的抗癌活性最强的植物次生代谢物质,也是抗癌防癌的最佳天然产物^[19-20],同时还具有抗肿瘤^[7]、抗炎^[6]、抗氧化^[21]、改善糖尿病^[22]和心血管疾病^[23]的作用。

2.2 植物保护

硫苷-黑芥子酶防御体系是十字花科植物中研究最为透彻的植物化学防御体系,也称为“芥子油炸弹”,为大多数十字花科蔬菜提供了应对食草动物侵害的能力^[4]。异硫氰酸盐作为一种挥发性物

质,可以起到驱赶昆虫取食的作用。此外,异硫氰酸盐也是对昆虫具有毒性的物质,不仅可以抑制昆虫生长,甚至可引起死亡^[24]。

硫苷还被证实对多种病原菌产生显著的抑制作用,并且能够阻止病毒复制^[25-26]。张丽萍等^[5]发现高硫苷含量的晋黄芥油菜可以抑制棉花黄萎病菌和红腐病菌的生长,且随着油菜组织用量的增加,抑制效果增强。目前已有研究表明,可将硫苷降解产物用作食品中的抗微生物制剂^[27],但应考虑硫苷的种类和含量,以及不同部位组织的硫苷差异,以获得最佳的抑菌效果。

2.3 风味贡献

硫苷的水解产物异硫氰酸盐等物质,具有独特的辛辣味,是十字花科蔬菜独特风味的主要来源^[28]。张秀海^[29]以独行菜、播娘蒿、沼生蔊菜等 10 种野生十字花科蔬菜为试验样本,研究硫苷对十字花科蔬菜风味的影响,结果表明,沼生蔊菜中吲哚族硫苷含量高,其挥发性风味物质中也检测到具有辛辣味的物质;葶苈的总硫苷含量最低,其挥发性风味物质含量也相对较低。张腾^[30]在腌制大头菜的过程中,发现脂肪族硫苷和吲哚族硫苷的含量会随着腌制时间的延长而逐渐降低,推测硫苷的降解会产生异硫氰酸盐等物质,赋予腌制大头菜辛辣刺激的风味。

3 硫代葡萄糖苷在十字花科蔬菜中的含量和分布

3.1 十字花科蔬菜不同种类和不同品种的硫代葡萄糖苷含量

在白菜、芥菜、西蓝花、萝卜等众多十字花科蔬菜中,硫苷含量存在着显著差异。何洪巨等^[31]以芸薹属中的白菜类、芥菜类和甘蓝类为试验材料,对硫苷含量进行测定,发现 3 类蔬菜硫苷含量差异较大。芥菜类总硫苷含量(b ,后同)为 $4.82 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,甘蓝类为 $5.34 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,远高于白菜类的总硫苷含量($1.79 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)。孙秀波等^[32]研究表明,甘蓝类的硫苷含量是白菜类和芥菜类的 10 多倍,是萝卜类的 15 倍。

同一蔬菜不同品种的硫苷含量也存在差异。张子轩等^[33]通过对比 11 个萝卜品种的硫苷含量,发现含量最高的是甜脆水果,含量最低的是板叶白。董莉^[34]在对甘蓝不同变种的硫苷含量进行分析时,发现硫苷含量最高的是红球甘蓝,最低的是羽衣甘蓝。

3.2 十字花科蔬菜不同生长阶段和不同器官的硫代葡萄糖苷含量

十字花科蔬菜中的硫苷通常在幼嫩叶片和根部合成,然后通过韧皮部和蔗糖从营养器官转运到生殖器官中,到了生殖生长时期,植物逐渐衰老,幼嫩叶片和茎秆中的硫苷转移至角果壁中,最后储存在种子中。所以,在一般情况下,种子的硫苷含量会明显高于其他器官^[35]。秦晗等^[36]对甘蓝型油菜、埃塞俄比亚芥、芥菜型油菜和白菜型油菜的不同器官(根、叶、种子)进行硫苷含量分析,发现在这4种植物中普遍为种子的总硫苷含量最高,叶片的含量最低。马丽聪^[37]研究了4个菜心品种(包括2个早熟品种和2个中晚熟品种)不同组织部位(嫩叶、最大叶、薹茎、花蕾)在不同生长阶段(7叶1心、现蕾、

开花)的硫苷含量,结果显示,在前两个生长阶段,中晚熟菜心不同组织的总硫苷含量都高于早熟菜心,其中,最大叶的总硫苷含量最高,花蕾的总硫苷含量最低。王峰^[38]通过高效液相色谱技术测定青花菜相邻生育期及不同器官中的硫苷含量,发现青花菜莲座期根部的总硫苷含量最高,现蕾期功能叶中总硫苷含量最高,收获期花蕾中总硫苷含量最高,开花期总硫苷含量最高的部位是花梗,结籽期总硫苷含量最高的部位是长角果。袁伟玲等^[39]通过高效液相色谱法,对3个水果萝卜品种肉质根和叶片的硫苷含量进行分析,发现沙窝萝卜的肉质根和叶片总硫苷含量最高,且肉质根的总硫苷含量高于叶片。Brown等^[35]通过分析拟南芥不同器官的硫苷含量,发现种子的总硫苷含量比根高(表1)。

表1 不同十字花科蔬菜不同生长阶段不同部位的总硫苷含量差异

Table 1 The difference of total glucosinolate content in different Cruciferous vegetables and different parts at different growth stages

蔬菜种类 Type of vegetable	时期 Period	部位 Part	b(总硫苷) Total glucosinolate content/($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	文献 Reference
甘蓝型油菜 <i>Brassica napus</i> L.	结籽期 Siliqua stage	种子 Seed	49.56±7.59	[36]
	10叶期 10-leaf stage	叶片 Leave	2.53±0.15	[36]
		根 Root	12.86±6.16	[36]
埃塞俄比亚芥 <i>B. carinata</i> A. Braun	结籽期 Siliqua stage	种子 Seed	145.44±59.39	[36]
	10叶期 10-leaf stage	叶片 Leave	1.12±0.42	[36]
		根 Root	2.09±1.01	[36]
芥菜型油菜 <i>B. juncea</i> (L.) Czern.	结籽期 Siliqua stage	种子 Seed	164.77±54.43	[36]
	10叶期 10-leaf stage	叶片 Leave	2.13±0.40	[36]
		根 Root	1.67±0.60	[36]
白菜型油菜 <i>B. rapa</i> L.	结籽期 Siliqua stage	种子 Seed	148.81±51.45	[36]
	10叶期 10-leaf stage	叶片 Leave	5.94±0.84	[36]
		根 Root	0.95±6.55	[36]
菜心(油绿802) <i>B. campestris</i> L. (Youlü 802)	7叶1心期 The seven leaves and one heart stage	嫩叶 Young leave	87.048±2.65	[37]
		最大叶 Maximum leave	133.62±3.38	[37]
		薹茎 Stalk	102.04±1.14	[37]
	现蕾期 Budding stage	嫩叶 Young leave	146.96±7.56	[37]
		最大叶 Maximum leave	143.57±3.52	[37]
		薹茎 Stalk	105.66±3.37	[37]
		花蕾 Bud	89.58±4.616	[37]
	开花期 Flowering stage	嫩叶 Young leave	148.264±4.591	[37]
		最大叶 Maximum leave	164.527±2.936	[37]
		薹茎 Stalk	112.94±3.428	[37]
		花蕾 Bud	71.63±1.143	[37]
青花菜 <i>B. oleracea</i> L.	莲座期—结籽期 Rosette stage to siliqua stage	功能叶 Functional leave	1.43~10.23	[38]
		花梗 Stalk	10.06~11.66	[38]
	结籽期 Siliqua stage	茎 Stem	3.98~8.37	[38]
		根 Root	5.34~13.99	[38]
		长角果 Siliqua	13.32	[38]
沙窝萝卜 <i>Raphanus sativus</i> L.	膨大期 Bulking stage	肉质根 Root	28 200.70±96.17	[39]
		叶片 Leave	6 192.69±5.02	[39]
拟南芥 <i>Arabidopsis thaliana</i> (L.) Heynh.	衰老期 Senescence stage	种子 Seed	63.38±12.55	[35]
	蕾薹期 Bolt stage	根 Root	18.61±8.09	[35]

GTR 转运蛋白在植物硫苷运输过程中扮演着重要角色,可将根部硫苷运输至叶与果^[40]。在拟南芥 *atgtr1atgtr2* 双突变体的种子中几乎检测不到硫苷的含量,说明 *ATGTR1* 和 *ATGTR2* 可以将拟南芥的硫苷转移至种子中^[41]。江定^[42]通过干涉芥蓝 *BocGTR1a* 在叶片中的表达,发现叶片中的硫苷含量显著降低,根部的硫苷含量显著升高,说明 *BocGTR1a* 可能参与芥蓝不同组织部位的硫苷运输。

4 十字花科蔬菜采前提高硫代葡萄糖苷含量的方法

一般而言,硫苷的含量受环境和遗传因素的共同影响^[43],在采用不同方法提高蔬菜硫苷含量时,应充分考虑不同蔬菜品种对各类处理方法的响应差异,寻找适宜该品种提高硫苷含量的最佳方式与剂量,实现最大限度地提高硫苷含量而不影响植物的生长。

4.1 合理施肥

硫苷是含氮、含硫的植物次生代谢物质,氮硫的供应水平可直接影响硫苷的合成^[44-45]。陈新娟^[3]通过对小白菜施加硫肥后,发现小白菜的总硫苷含量显著增加。Vallejo 等^[46]对 3 个西蓝花品种的 5 个花蕾发育阶段分别施用贫硫肥(15 kg·hm⁻²)和富硫肥(150 kg·hm⁻²),发现在贫硫肥的施用下,第二发育阶段的硫苷浓度最高,而第三阶段施用富硫肥可以达到硫苷含量的高峰。王成^[47]发现陕油 28 号油菜品种的硫苷含量随施氮肥的增加而增加,与不施氮肥相比,当施氮量为 360 kg·hm⁻²时,籽粒硫苷含量增加了 33%。

硒是植物中的一种重要微量元素,在植物体中与硫的代谢途径相同,同时影响硫苷的合成^[48]。范悦等^[49]通过对青花菜喷施不同种类和浓度的硒肥,发现 6.0 mg·L⁻¹的富硒宝、2.3 mg·L⁻¹的有机硒肥可以显著提高青花菜的总硫苷含量。

4.2 补充光质

不同光谱成分影响十字花科蔬菜的硫苷含量。Zheng 等^[50]使用不同强度的蓝光处理能使白菜的硫苷含量增加,并且蓝光强度越高,硫苷含量增加越多。红光处理同样能促进十字花科蔬菜的硫苷含量增加,Engelen-Eigles 等^[51]研究发现,红光下豆瓣菜的硫苷含量高于白光。此外,光质与褪黑激素搭配会对植物的生长和硫苷含量产生影响,Zhou 等^[52]发现白光配合褪黑激素的处理显著促进了硫苷

在芽苗中的积累,与单独使用白光相比,硫苷含量增加了 47.89%。

紫外线辐射(UV 辐射)也能提高十字花科蔬菜的硫苷含量,根据波长的不同,可将 UV 辐射分为以下 3 类:UV-A(320~400 nm)、UV-B(280~320 nm)和 UV-C(100~280 nm)。UV 辐射能够激活一系列与硫苷合成相关的基因表达^[53],也能通过调节植物激素水平,如提高脱落酸含量^[54],降低油菜素内酯含量^[55],从而影响硫苷的生物合成。UV-A 辐射能够在不同程度上提高抱子甘蓝^[56]、花菜^[57]和白芥^[58]的吲哚硫苷含量。另外,使用不同剂量的 UV-B 辐射处理青花菜^[59]、萝卜^[60]和羽衣甘蓝^[61],硫苷含量分别增加 20%、37%和 39%。

4.3 高温诱导

高温能使大部分的十字花科蔬菜的硫苷含量提高^[62]。冯毅^[63]使用 40 °C 高温处理芥蓝基因型矮脚香菇,发现其地上部分的硫苷含量显著上升。Bohinc 等^[64]发现花椰菜在 22 °C/18 °C 和 18 °C/12 °C 昼夜温度的硫苷含量明显低于 30 °C/15 °C 昼夜温度。Guo 等^[65]通过高温处理西蓝花,发现 3 种脂肪族硫苷含量均显著提高。

4.4 选择合适的采收时间

采收期和采收时间对十字花科植物硫苷含量均有一定的影响。陈新娟^[3]发现小白菜的硫苷含量随采收期的延长而降低。延长甘蓝采收时间同样也会降低其硫苷含量^[66]。Casajús 等^[67]研究发现,相对其他时间来说,在中午采收西蓝花提高了采后贮藏期的硫苷含量。

4.5 激素处理

水杨酸(SA)、脱落酸(ABA)、茉莉酸甲酯(MeJA)等多种激素均可提高十字花科蔬菜的硫苷含量。水杨酸对硫苷的诱导作用受其浓度及诱导时长的影响,Guo 等^[68]使用 SA 处理芥菜 6 h,发现硫苷含量下降,但在继续处理 24 h 和 48 h 后持续上升。另外,1.5 mmol·L⁻¹的 SA 也会促进萝卜肉质根的硫苷积累^[69]。外源 ABA 处理能够显著提高小白菜和大白菜的硫苷含量^[70-71]。MeJA 对硫苷合成具有强烈的诱导作用,较低浓度的 MeJA 处理能使植物的硫苷含量大幅增加。姚丹艳^[72]通过外源施用 60~100 μmol·L⁻¹的 MeJA 处理青花菜,发现萝卜硫素含量增加 0.4~4.5 倍。梁曼恬^[73]通过外源施用 MeJA 处理青花菜的花球,发现湘绿 3 号的总硫苷含量提高了 1.89 倍,炎秀的总硫苷含量提高了 2.03 倍。

5 硫代葡萄糖苷在十字花科蔬菜采后贮藏与加工过程中的变化及影响因素

硫苷的化学性质相对稳定,但蔬菜采后的硫苷含量容易受到外界环境因素的直接或间接影响^[74],包括温度、解冻方式、光照、湿度、昆虫进食、保存方法、微酸电解水处理、1-MCP 和 6-BA 处理以及烹饪方式等。

第一,温度管理是保持硫苷含量的关键,其中低温冷藏对维持硫苷水平尤为重要。在 0 °C 和 5 °C 冷藏期间,青花菜花球中的硫苷含量较稳定,但是在 10 °C 下贮藏 9 d 后,硫苷含量开始明显下降,且此时的花蕾出现黄化,外观品质较差^[75]。第二,解冻蔬菜时,选择适当的方法可以有效避免硫苷含量的流失。仇宏伟等^[76]发现,冷冻贮藏的西蓝花在经过不同方式解冻后,总硫苷含量均出现下降趋势,其中静水解冻导致硫苷流失最为严重,而微波解冻和汽蒸解冻流失的硫苷较少。第三,适宜的光照和湿度条件能够保持鲜切西蓝花的硫苷含量。光强度 25~35 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 与湿度 70%~80% 的环境可以有效保持鲜切西蓝花中的硫苷含量^[77];光照度 2000~2500 lx 与湿度 70%~80% 的环境也可以有效保持鲜切西蓝花的硫苷含量^[78]。第四,硫苷介导的防御体系在蔬菜对抗昆虫取食的过程中起到了重要作用。桃蚜在食用了离体的芥菜叶片后,叶片中的吲哚族硫苷含量显著上升,这表明吲哚族硫苷含量的增加并非仅由其他组织部位的转运所引起,还由于昆虫的取食行为所诱导^[79]。第五,选择合适的保存方式,如冷冻和薄膜包装,对减少硫苷损失也有着良好效果。羽衣甘蓝的冷冻、罐装、热风干和冻干产品经过 12 个月贮存后,总硫苷保留率分别为 91%、57%、50% 和 57%^[80]。陈皖豫^[81]发现对采后娃娃菜进行薄膜包装有利于延缓总硫苷的降解。第六,微酸电解水具有延缓硫苷降解的功能。在娃娃菜货架期的第 8 天,提前用 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微酸电解水处理的娃娃菜中总硫苷含量为 0.61 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,相较于未处理组提高了 30.11%^[82]。50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微酸电解水处理相较于自来水冰处理也可有效延缓西蓝花花蕾中硫苷的降解速率^[83]。第七,1-MCP(1-甲基环丙烯)作为一种乙烯抑制剂,可通过抑制乙烯的生成,延缓硫苷的降解。通过 1-MCP 熏蒸处理改变贮藏环境,青花菜和娃娃菜贮藏期的总硫苷含量降解速率均有所下降^[81,84]。第八,6-BA(6-苄氨基嘌呤)

作为一种细胞分裂素,可以显著保持西蓝花在贮藏期的总硫苷含量^[85]。用 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 6-BA 和蒸馏水(对照)处理西蓝花小花,在 15 °C 下贮藏 4 d,贮藏期间,西蓝花小花的总硫苷含量明显高于对照^[86]。通过 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 6-BA 浸泡处理,鲜切西蓝花在贮藏第 8 天时,处理组西蓝花的总硫苷含量高于未处理组 66.23%^[78]。第九,不同烹饪方式显著影响蔬菜中的硫苷含量。在汽蒸和微波烹饪方式下,青花菜总硫苷含量随时间的延长而出现先下降后上升的趋势,而水煮方式下总硫苷含量则持续下降,其中,汽蒸方式相对于微波和水煮方式,能够更大程度地保持青花菜的总硫苷含量^[84]。5 种花椰菜在经过不同的烹饪(热烫 3 min、煮 10 min、蒸 10 min)后,发现煮和烫的烹饪方式使硫苷的损失最大,损耗达到 50%,而蒸的烹饪方式仅有 19% 的损耗^[87]。

采后蔬菜中硫苷的不稳定性必然会影响到蔬菜的商品价值和市场竞争力,因此,通过不同方式保持采后蔬菜贮藏与加工过程中的硫苷含量对维持其生物活性和应用价值至关重要,可为消费者提供更健康的饮食选择。

6 硫代葡萄糖苷的提取工艺

6.1 灭酶处理

黑芥子酶与硫苷的结合会使硫苷产生降解反应,因此在硫苷提取之前,应对植物组织进行灭酶处理^[88]。灭酶的方法有多种,包括微波灭酶、热处理灭酶、NaCl 灭酶以及超声波处理灭酶等。叶珊珊^[89]通过对比微波处理、热处理、打浆处理、浸泡处理和超声处理 5 种方法对新鲜西蓝花灭酶效果的影响,发现热处理(把新鲜西蓝花切片放入到 75 °C 的 95% 乙醇中,并加热到 80 °C,保持 20 min)为灭酶的最佳方法,提取的硫苷质量浓度为 0.184 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。

6.2 硫代葡萄糖苷的提取

硫苷为亲水性分子,所以目前最常用的硫苷提取方法是溶剂提取法^[90],该方法通过选择不同的溶剂(如乙醇、甲醇、水和醇混合液)结合不同的提取条件(如温度、时间、料液比等)来提取硫苷,大多数研究选择乙醇作为提取硫苷的溶剂(表 2)^[37,91-96]。

若想最大限度地提高硫苷的提取效率,可以通过单因素试验和正交试验来优化提取过程中的各项参数,确定最佳提取工艺。此外,使用不同的溶剂提取硫苷会导致提取效率不同。张胜智^[97]发现西蓝花种子的硫苷使用水提取比使用甲醇提取更适

表2 不同十字花科蔬菜中的最佳硫苷提取工艺

Table 2 Optimal glucosinolates extraction process from different Cruciferous vegetables

蔬菜 Vegetable	组织 Tissue	最佳提取工艺 Optimal extraction process				硫苷含量 Glucosino- late content	文献 Reference
		φ (乙醇) Ethanol concentration/%	料液比 Feed-liquid ratio	提取温度 Extraction temperature/°C	提取时间 Extraction time/min		
菜心 <i>B. campestris</i> L.	叶片 Leave	50	1:55	65	6	137.92 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$	[37]
青花菜 <i>B. oleracea</i> L.	花球 Flower head	90	1:9	60	30	414.98 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$	[91]
青花菜 <i>B. oleracea</i> L.	花蕾 Flower bud	75	1:7	80	20	33.71 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$	[92]
玛咖 <i>Lepidium meyenii</i> Walp.	胚轴 Hypocotyl	58	1:10	70	90	14.2 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$	[93]
西蓝花 <i>B. oleracea</i> L.	种子 Seed	51	1:18	69	16	147.19 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	[94]
西蓝花 <i>B. oleracea</i> L.	茎 Stem	75	1:15	70	30	601.24 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$	[95]
芥菜 <i>Capsella bursa- pastoris</i> (L.) Medik.	整株 Whole plant	70	1:25	80	30	56.2 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	[96]

合,提取率提高 10%~20%。

6.3 硫代葡萄糖苷的纯化

上述方法所得的硫苷粗提物中含有蛋白质、多糖等杂质,如油菜籽粕的乙醇提取物中含有 42% 的蛋白质^[98]。为了进一步分析其硫苷组成,探究单一硫苷的药理学特性,拓展其利用价值,需要对粗提物进行纯化。杨佳航^[99]比较了 Sevag 法、单宁酸法、饱和氯化钠法、硅胶法和壳聚糖法 5 种方法对去除萝卜硫苷粗提液中水溶性蛋白的影响,发现 Sevag 法对新鲜西蓝花中萝卜硫苷的损失率最低,去除率为 88.79%。Cao 等^[100]将 0.2、0.5 和 1.0 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaCl 溶液作为洗脱缓冲液,其中 1.0 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaCl 溶液去除了大部分杂质,并保证了 91.0% 的硫苷回收率。祝亚辉等^[94]通过使用切向流超滤膜包对萝卜硫苷粗提物进行纯化处理,发现萝卜硫苷的纯度由 34.96% 提高到了 54.89%。

6.4 硫代葡萄糖苷的检测分析

随着科技的进步,目前常用的硫苷检测分析方法有:液相色谱法(HPLC)、气相色谱法(GC)、质谱法(MS)等。Maldini 等^[101]使用液相色谱法对 113 份芜菁资源进行硫苷检测分析,发现 113 份芜菁资源有 16 种不同的硫苷成分。

由于单独的液相色谱法不能完整地实现对复杂植物中所有组分的高效分离,而质谱法却可以对目标化合物进行准确的定量分析,因此液相色谱-质谱联用技术(HPLC-MS)结合了液相色谱的优异分离能力和质谱的精准检测能力,从而实现了

植物样品中硫苷的全面分析和定量,现已广泛应用于硫苷的检测分析^[102-103]。Sun 等^[104]采用 HPLC-MS 的方法鉴定芥蓝的硫苷成分,发现芥蓝有 8 种脂肪族硫苷、4 种吲哚族硫苷和 1 种芳香族硫苷。Sasaki 等^[105]采用 HPLC-MS 的方法鉴定分析了 6 个西蓝花品种、24 个羽衣甘蓝品种和 32 个白菜品种的硫苷成分。

7 展望

十字花科蔬菜含有丰富的硫代葡萄糖苷,但不同种类和品种的蔬菜硫苷含量及成分都不相同,并且同一植物的不同生长阶段和不同组织器官中,硫苷的含量也会有所变化。硫苷的合成、转运和代谢受到多种因素的影响,在蔬菜采前阶段和采后阶段,不同的气候条件、不同的外源处理,甚至是蔬菜的包装与烹饪方式等都会影响硫苷的含量和组分变化。因此,深入研究影响十字花科蔬菜硫苷含量与稳定性的内外因素,将有助于提升蔬菜的营养价值,为改善人类健康及增强植物抗逆性的研究提供理论依据和实践指导。

另外,目前硫苷的提取效率和稳定性仍有待提高,通过了解目前新兴且绿色的硫苷提取工艺,研究对比不同蔬菜的硫苷最佳提取工艺,可以提高硫苷的提取效率和纯度,降低提取成本,减少对环境的负面影响。而高纯度和生物活性高的硫苷提取物,不仅可以满足食品和药品行业的需求,还可以推动十字花科蔬菜的深加工应用,为提升其在市场

中的竞争力提供有力支持。

参考文献

- [1] WIECZOREK M N, MAJCHER M A, JELEŃ H H. Identification of aroma compounds in raw and cooked broccoli[J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2021, 36(5):576-583.
- [2] BELL L, OLOYEDE O O, LIGNOU S, et al. Taste and flavor perceptions of glucosinolates, isothiocyanates, and related compounds[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2018, 62(18):1700990.
- [3] 陈新娟. 中国芸薹属蔬菜硫代葡萄糖苷及其影响因子研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- [4] 马小丽. 小菜蛾 GSS 和 SUMF 解毒寄主植物硫苷分子研究[D]. 福州:福建农林大学, 2017.
- [5] 张丽萍, 魏明峰, 张贵云, 等. 高硫甘油菜对棉花黄萎病菌和红腐病菌的抑制活性[J]. *中国棉花*, 2017(44):10-14.
- [6] CALABRESE E J, KOZUMBO W J. The phytoprotective agent sulforaphane prevents inflammatory degenerative diseases and age-related pathologies via Nrf2-mediated hormesis[J]. *Pharmacological Research*, 2021, 163:105283.
- [7] KAISER A E, BANIASADI M, GIANSIRACUSA D, et al. Sulforaphane: A broccoli bioactive phytochemical with cancer preventive potential[J]. *Cancers*, 2021, 13(19):4796.
- [8] FAHEY J W, ZALCMANN A T, TALALAY, P. The chemical diversity and distribution of glucosinolates and isothiocyanates among plants[J]. *Phytochemistry*, 2002, 56(2):237.
- [9] 廖永翠. 白菜类作物硫代葡萄糖苷结构和含量的分析及 QTL 定位[D]. 重庆:西南大学, 2011.
- [10] 雷建军, 陈长明, 陈国菊, 等. 硫苷及其生物合成分子生物学机理研究进展[J]. *华南农业大学学报*, 2019, 40(5):59-70.
- [11] MITHEN R. Glucosinolates - biochemistry, genetics and biological activity[J]. *Plant Growth Regulation*, 2001, 34(1):91-103.
- [12] FALK K L, VOGEL C, TEXTOR S. Glucosinolate biosynthesis: Demonstration and characterization of the condensing enzyme of the chain elongation cycle in *Eruca sativa*[J]. *Phytochemistry*, 2004, 65:1073-1084.
- [13] WANG P, CAO W X, YANG L W, et al. Glucosinolate biosynthetic genes of cabbage: Genome-wide identification, evolution, and expression analysis[J]. *Genes*, 2023, 14(2):476.
- [14] CHEN Y Z, YAN X F, CHEN S X. Bioinformatic analysis of molecular network of glucosinolate biosynthesis[J]. *Computational Biology and Chemistry*, 2011, 35(1):10-18.
- [15] WITTSTOCK U, HALKIER B A. Glucosinolate research in the *Arabidopsis* era[J]. *Trends in Plant Science*, 2002, 7(6):263-270.
- [16] KISSEN R, POPE T W, GRANT M, et al. Modifying the alkyl-glucosinolate profile in *Arabidopsis thaliana* alters the tritrophic interaction with the herbivore *brevicoryne brassicae* and parasitoid *diaeretiella rapae*[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2009, 35(8):958-969.
- [17] 杨瑛洁, 李淑燕, 胡国伟, 等. 硫代葡萄糖苷的降解途径及其产物的研究进展[J]. *西北植物学报*, 2011, 31(7):1490-1496.
- [18] 彭佩, 卿志星, 田艳, 等. 十字花科植物中硫代葡萄糖苷激发因子研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(4):886-891.
- [19] HERR I, LOZANOVSKI V, HOUBEN P, et al. Sulforaphane and related mustard oils in focus of cancer prevention and therapy[J]. *Wiener Medizinische Wochenschrift*, 2013, 163(3/4):80-88.
- [20] GORISSEN A, KRAUT N U, DE VISSER R, et al. No *de novo* sulforaphane biosynthesis in broccoli seedlings[J]. *Food Chemistry*, 2011, 127(1):192-196.
- [21] ZHOU S S, JIN J P, BAI T, et al. Potential drugs which activate nuclear factor E2-related factor 2 signaling to prevent diabetic cardiovascular complications: A focus on fumaric acid esters[J]. *Life Sciences*, 2015, 134:56-62.
- [22] ZHANG Y, WU Q F, LIU J, et al. Sulforaphane alleviates high fat diet-induced insulin resistance via AMPK/Nrf2/GPx4 axis[J]. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 2022, 152:113273.
- [23] BOSE C, ALVES I, SINGH P, et al. Sulforaphane prevents age-associated cardiac and muscular dysfunction through Nrf2 signaling[J]. *Aging Cell*, 2020, 19(11):e13261.
- [24] CHHAJED S, MOSTAFA I, HE Y, et al. Glucosinolate biosynthesis and the glucosinolate-myrosinase system in plant defense[J]. *Agronomy*, 2020, 10:1786.
- [25] NUGON-BAUDON L, RABOT S. Glucosinolates and glucosinolate derivatives: Implications for protection against chemical carcinogenesis[J]. *Nutrition Research Reviews*, 1994, 7(1):205-231.
- [26] CHEN S, ANDREASSON E. Update on glucosinolate metabolism and transport[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2001, 39(9):743-758.
- [27] BUSKOV S, SERRA B, ROSA E, et al. Effects of intact glucosinolates and products produced from glucosinolates in myrosinase-catalyzed hydrolysis on the potato cyst nematode (*Globodera rostochiensis* cv. Woll)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(4):690-695.
- [28] PEREIRA F M V, ROSA E, FAHEY J W, et al. Influence of temperature and ontogeny on the levels of glucosinolates in broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) sprouts and their effect on the induction of mammalian phase 2 enzymes[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(21):6239-6244.
- [29] 张秀海. 野生十字花科蔬菜硫苷鉴定及风味研究[D]. 河北张家口:河北北方学院, 2023.
- [30] 张腾. 襄阳大头菜腌制过程中风味物质的变化规律及其机制研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2017.
- [31] 何洪巨, 陈杭, SCHNITZLER W H. 芸薹属蔬菜中硫代葡萄糖苷鉴定与含量分析[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(2):192-197.
- [32] 孙秀波, 慕美财, 李玫瑰, 等. 十字花科蔬菜硫代葡萄糖苷含量比较[J]. *安徽农学通报*, 2007, 13(19):64-65.
- [33] 张子轩, 陈奕州, 白瑞, 等. 不同萝卜品种总硫代葡萄糖苷含量分析[J]. *中国瓜菜*, 2021, 34(5):64-67.
- [34] 董莉. 不同甘蓝种质及甘蓝感染根肿病后的硫苷组分和含量分析[D]. 重庆:西南大学, 2013.
- [35] BROWN P D, TOKUHISA J G, REICHEL T M, et al. Variation of glucosinolate accumulation among different organs and developmental stages of *Arabidopsis thaliana*[J]. *Phytochemistry*, 2003, 62(3):471-481.
- [36] 秦晗, 张文娜, 王猛, 等. 四个芸薹属物种硫苷含量与种类分析及特殊硫苷成分的种间导入[J]. *植物遗传资源学报*, 2020, 21(1):94-104.

- [37] 马丽聪. 菜心硫代葡萄糖苷提取工艺优化的研究[D]. 广州: 广州大学, 2024.
- [38] 王峰. 青花菜中萝卜硫素和硫苷含量的时空变化分析[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022.
- [39] 袁伟玲, 袁尚勇, 崔磊, 等. 水果萝卜肉质根和叶片硫代葡萄糖苷鉴定及含量分析[J]. 中国蔬菜, 2017(11): 27-32.
- [40] HARUN S, ABDULLAH-ZAWAWI M R, GOH H H, et al. A comprehensive gene inventory for glucosinolate biosynthetic pathway in *Arabidopsis thaliana*[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(28): 7281-7297.
- [41] NOUR-ELDIN H H, ANDERSEN T G BUROW M, et al. NRT/PTR transporters are essential for translocation of glucosinolate defence compounds to seeds[J]. Nature, 2012, 488(7412): 531-534.
- [42] 江定. 芥蓝硫苷转运相关基因 *BocGTR1s* 的克隆与功能研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
- [43] BJÖRKMAN M, KLINGEN I, BIRCH A N E, et al. Phytochemicals of brassicaceae in plant protection and human health--influences of climate, environment and agronomic practice[J]. Phytochemistry, 2011, 72(7): 538-556.
- [44] MITHEN R F, DEKKER M, VERKERK R, et al. The nutritional significance, biosynthesis and bioavailability of glucosinolates in human foods[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2000, 80(7): 967-984.
- [45] SHATTUCK V I, WANG W. Nitrogen dioxide fumigation alters the glucosinolate and nitrate levels in pak choy (*Brassica campestris* ssp. *chinensis*) [J]. Scientia Horticulturae, 1993, 56(2): 87-100.
- [46] VALLEJO F, GARCIA-VIGUERA C, TOMAS-BARBERAN F A. Changes in broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) health-promoting compounds with inflorescence development[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(13): 3776-3782.
- [47] 王成. 氮肥水平对冬油菜产量和品质协同调控机制研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [48] 张婧怡, 郑岩, 崔方超, 等. 萝卜硫素的合成、功能及其外源调控研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(12): 173-180.
- [49] 范悦, 刘光敏, 黄伟, 等. 不同硒肥对青花菜硫苷及硒含量的影响[J]. 中国蔬菜, 2022(8): 36-41.
- [50] ZHENG Y J, ZHANG Y T, LIU H C, et al. Supplemental blue light increases growth and quality of greenhouse pak choi depending on cultivar and supplemental light intensity[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(10): 2245-2256.
- [51] ENGELEN-EIGLES G, HOLDEN G, COHEN J D, et al. The effect of temperature, photoperiod, and light quality on glucosinolate concentration in watercress (*Nasturtium officinale* R. Br.) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 23: 101560.
- [52] ZHOU A L, TANG J Y, LI Y, et al. Combination of light quality and melatonin regulates the quality in mustard sprouts[J]. Food Chemistry-X, 2024, 23: 101560.
- [53] FRERIGMANN H, GIGOLASHVILI T. MYB34, MYB51, and MYB122 distinctly regulate indolic glucosinolate biosynthesis in *Arabidopsis thaliana*[J]. Molecular Plant, 2014, 7(5): 814-828.
- [54] TOSSI V, CASSIA R, LAMATTINA L. Apocynin-induced nitric oxide production confers antioxidant protection in maize leaves[J]. Journal of Plant Physiology, 2020, 248: 153157.
- [55] LIAO K, PENG Y J, YUAN L B, et al. Brassinosteroids antagonize jasmonate-activated plant defense responses through BRI-EMS-SUPPRESSOR1 (BES1) [J]. Plant Physiology (Bethesda), 2020, 182(2): 1066-1082.
- [56] ACHARYA J, RECHNER O, NEUGART S, et al. Effects of light-emitting diode treatments on *Brevicoryne brassicae* performance mediated by secondary metabolites in Brussels sprouts[J]. Journal of Plant Diseases and Protection, 2016, 123(6): 321-330.
- [57] RECHNER O, NEUGART S, SCHREINER M, et al. Can narrow-bandwidth light from UV-A to green alter secondary plant metabolism and increase *Brassica* plant defenses against aphids? [J]. PloS One, 2017, 12(11): e0188522.
- [58] REIFENRATH K, MÜLLER C. Species-specific and leaf-age dependent effects of ultraviolet radiation on two Brassicaceae[J]. Phytochemistry, 2007, 68(6): 875-885.
- [59] LU Y J, DONG W, YANG T B, et al. Preharvest UVB application increases glucosinolate contents and enhances postharvest quality of broccoli microgreens[J]. Molecules, 2021, 26(11): 3247.
- [60] MARTÍNEZ-ZAMORA L, CASTILLEJO N, ARTÉS-HERNÁNDEZ F. Postharvest UV-B and UV-C radiation enhanced the biosynthesis of glucosinolates and isothiocyanates in Brassicaceae sprouts[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 181: 111650.
- [61] CASTILLEJO N, MARTÍNEZ-ZAMORA L, ARTÉS-HERNÁNDEZ F. Periodical UV-B radiation hormesis in biosynthesis of kale sprouts nutraceuticals[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 165: 274-285.
- [62] GUO R F, WANG X R, HAN X Y, et al. Comparative transcriptome analyses revealed different heat stress responses in high and low-gs *Brassica alboglabra* sprouts[J]. BMC Genomics, 2019, 20: 269.
- [63] 冯毅. 不同基因型芥蓝硫苷分析[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
- [64] BOHINC T, TRDAN S. Environmental factors affecting the glucosinolate content in Brassicaceae[J]. Journal of Food Agriculture and Environment, 2012, 10(2): 357-360.
- [65] GUO L P, YANG R Q, ZHOU Y L, et al. Heat and hypoxia stresses enhance the accumulation of aliphatic glucosinolates and sulforaphane in broccoli sprouts[J]. European Food Research and Technology, 2016, 242(1): 107-116.
- [66] BROWN A F, YOUSEF G G, JEFFERY E H, et al. Glucosinolate profiles in broccoli: Variation in levels and implications in breeding for cancer chemoprotection[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2002, 127(5): 807-813.
- [67] CASAJÚS V, CIVELLO P, MARTÍNEZ G, et al. Effect of continuous white light illumination on glucosinolate metabolism during postharvest storage of broccoli[J]. Food Science and Technology, 2021, 145: 111302.
- [68] GUO R F, SHEN W S, QIAN H M, et al. Jasmonic acid and glucose synergistically modulate the accumulation of glucosino-

- lates in *Arabidopsis thaliana*[J]. Journal of Experimental Botany, 2013, 64(18):5707-5719.
- [69] 陈微. 外源激素对萝卜肉质根硫苷和萝卜硫素含量的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2017.
- [70] WANG Z Y, YANG R Q, GUO L P, et al. Effects of abscisic acid on glucosinolate content, isothiocyanate formation and myrosinase activity in cabbage sprouts[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2015, 50(8):1839-1846.
- [71] 祝彪. 外源植物生长调节物质对小白菜硫代葡萄糖苷的影响及相关合成基因表达研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
- [72] 姚丹燕. 茉莉酸甲酯和硒对青花菜中萝卜硫素含量的影响研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2015.
- [73] 梁曼恬. 茉莉酸甲酯对青花菜萝卜硫素合成代谢的影响[D]. 长沙:湖南农业大学, 2021.
- [74] 饶帅琦, 陈晓琪, 杨静, 等. 环境因子对硫代葡萄糖苷影响的研究进展[J]. 植物生理学报, 2020, 56(9):1765-1772.
- [75] 汪俏梅, 胡家恕. 冷藏和气调处理对青花菜 Glucoraphanin 含量的影响[J]. 园艺学报, 2003, 30(3):286.
- [76] 仇宏伟, 王宏达, 郭雨萍. 不同解冻方式对速冻西蓝花品质影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(16):266-270.
- [77] 赵欢欢, 罗淑芬, 周宏胜, 等. 光照和湿度对西蓝花硫苷代谢及生物活性物质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(7):201-210.
- [78] 王瑶. 光照、湿度条件及 6-BA 处理对鲜切西蓝花硫苷代谢的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2020.
- [79] KIM J H, JANDER G. *Myzus persicae* (green peach aphid) feeding on *Arabidopsis* induces the formation of a deterrent indole glucosinolate[J]. Plant Journal, 2007, 49(6):1008-1019.
- [80] KORUS A, SŁUPSKI J, GĘBCZYŃSKI P, et al. Effect of preliminary processing and method of preservation on the content of glucosinolates in kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) leaves[J]. Food Science and Technology, 2014, 59:1003-1008.
- [81] 陈皖豫. 气调包装技术及 1-MCP 处理对娃娃菜采后贮藏品质的影响[D]. 江苏扬州:扬州大学, 2020.
- [82] 孟敌, 焦贺, 韩颖, 等. 超声雾化微酸性电解水对采后娃娃菜流通及货架品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(4):290-298.
- [83] 韩颖. 微酸性电解水对采后西蓝花流通品质的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2023.
- [84] 袁怡鸣. 贮藏与烹饪方式对青花菜硫苷和萝卜硫素的影响[D]. 长沙:湖南农业大学, 2020.
- [85] 罗淑芬, 郭峰, 孙莹, 等. 6-苜氨基嘌呤处理对鲜切西蓝花硫代葡萄糖苷代谢的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13):295-304.
- [86] XU F, YANG Z F, CHEN X H, et al. 6-Benzylaminopurine delays senescence and enhances health-promoting compounds of harvested broccoli[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(1):234-240.
- [87] HAJER B A, DONATA A, SIMONE T, et al. The effect of water stress on the glucosinolate content and profile: A comparative study on roots and leaves of *Brassica oleracea* L. crops[J]. Agronomy, 2023, 13(2):579.
- [88] 李宁. 西蓝花干硫苷的提取工艺优化及富集纯化研究[D]. 杭州:浙江工商大学, 2015.
- [89] 叶珊珊. 西蓝花中萝卜硫苷的提取及降解产物抑菌活性研究[D]. 杭州:浙江工商大学, 2013.
- [90] 林丽君, 聂黎行, 李耀磊, 等. 硫代葡萄糖苷提取、纯化、分离方法概述[J]. 中国药事, 2015, 29(10):1079-1082.
- [91] 贺霞, 张子轩, 张宇光, 等. 青花菜总硫代葡萄糖苷提取工艺的优化[J]. 中国瓜菜, 2021, 34(4):62-67.
- [92] 邓艳美, 王红妹, 万从庆. 青花菜中硫代葡萄糖苷的提取工艺[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(6):254-256.
- [93] CAMPOS D, CHIRINOS R, BARRETO O, et al. Optimized methodology for the simultaneous extraction of glucosinolates, phenolic compounds and antioxidant capacity from maca (*Lepidium meyenii*) [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 49:747-754.
- [94] 祝亚辉, 李修德, 郭俸钰, 等. 萝卜硫苷提取工艺的响应面优化研究[J]. 食品科技, 2022, 47(4):239-246.
- [95] 贾治勇, 张素敏, 贾阳希. 西蓝花茎中硫苷的提取工艺研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2016, 36(8):586-589.
- [96] 王风雷, 赵功玲, 李晓蝶. 芥菜中硫苷的提取工艺及抗氧化活性研究[J]. 农产品加工, 2019(11):35-37.
- [97] 张胜智. 西蓝花种子中硫代葡萄糖苷的提取及高纯度菜菔硫烷的制备工艺研究[D]. 北京:北京化工大学, 2012.
- [98] 周洁, 闫丽华, 王沛, 等. 菜籽粕硫苷的乙醇提取工艺优化及营养成分研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2023, 44(5):18-24.
- [99] 杨佳航. 西蓝花中萝卜硫苷的提取和纯化研究[D]. 杭州:浙江工商大学, 2018.
- [100] CAO Y H, GU Z R, MUTHUKUMARAPPAN K, et al. Separation of glucosinolates from camelina seed meal via membrane and acidic aluminum oxide column[J]. Journal of Liquid Chromatography and Related Technologies, 2015, 38:1273-1278.
- [101] MALDINI M, FODDAI M, NATELLA F, et al. Identification and quantification of glucosinolates in different tissues of *Raphanus raphanistrum* by liquid chromatography tandem-mass spectrometry[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2017, 61:20-27.
- [102] DEL CARPIO D P, BASNET R K, ARENDS D, et al. Regulatory network of secondary metabolism in *Brassica rapa*: Insight into the glucosinolate pathway[J]. PloS One, 2014, 9(9):e107123.
- [103] HAHN C, MÜLLER A, KUHNERT N, et al. Diversity of kale (*Brassica oleracea* var. *sabellica*): Glucosinolate content and phylogenetic relationships[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(16):3215-3225.
- [104] SUN B, LIU N, ZHAO Y T, et al. Variation of glucosinolates in three edible parts of Chinese kale (*Brassica alboglabra* Bailey) varieties[J]. Food Chemistry, 2011, 124(3):941-947.
- [105] SASAKI K, NEYAZAKI M, SHINDO K, et al. Quantitative profiling of glucosinolates by LC-MS analysis reveals several cultivars of cabbage and kale as promising sources of sulforaphane[J]. Journal of Chromatography B, 2012, 903:171-176.